(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 530 900**

(21) Número de solicitud: 201330682

(51) Int. Cl.:

G02B 5/00 (2006.01)
A61B 3/10 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

11.05.2013

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

06.03.2015

(56) Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2014/070371

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA (100.0%)
Edificio EMPRENDIA-Campus Vida
15782 Santiago de Compostela (A Coruña) ES

(72) Inventor/es:

ACOSTA PLAZA, Eva y
ARINES PIFERRER, Justo

(74) Agente/Representante:

PARDO SECO, Fernando Rafael

(54) Título: **Procedimiento, sistema y producto de programa informático para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo**

(57) Resumen:

La presente invención “Procedimiento, sistema y producto de programa informático para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo” se refiere a un sistema (100) para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo (101), que comprende un sub-sistema (104) adaptado para reducir la magnitud del astigmatismo presente en al menos un haz de luz proveniente de la retina del ojo (101); un sub-sistema (106) adaptado para codificar el haz de luz proveniente de la retina del ojo (101); un sub-sistema (110) adaptado para convertir el haz de luz codificado en una imagen codificada; un sub-sistema (111) adaptado para decodificar la imagen codificada de la retina del ojo (101). La invención se refiere también a un procedimiento ya un producto de programa informático para obtener imágenes de la retina de un ojo.

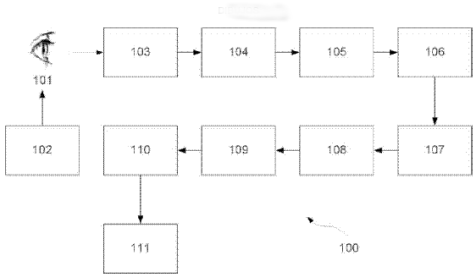

Figura 1

ES 2 530 900 A1

DESCRIPCIÓN

Procedimiento, sistema y producto de programa informático para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo

SECTOR TÉCNICO DE LA INVENCIÓN

La presente invención se refiere a un procedimiento para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo. Más concretamente, la invención se refiere a un procedimiento para obtener imágenes de alta resolución de la retina de un ojo, para cuya obtención se requiere superar la degradación inducida por las aberraciones ópticas de los haces de luz que emanan del ojo.

La invención se refiere también a un sistema y a un producto de programa informático para obtener imágenes de la retina de un ojo, adecuados para llevar a cabo este procedimiento.

La invención es aplicable a los sectores de instrumentación óptica, optoelectrónica, optometría y oftálmica. Más concretamente, es aplicable a aquellos sectores en los que se requiera superar la degradación inducida por las aberraciones ópticas de los haces de luz producidas por la propagación de la luz a través de un ojo, por ejemplo, humano.

ESTADO DE LA TÉCNICA

La obtención de imágenes (por ejemplo, imágenes de alta resolución) de la retina de un ojo involucra técnicas que permiten la corrección de la degradación de la imagen inducida por las aberraciones presentes en un ojo, por ejemplo, humano. Estas aberraciones presentan una componente de bajo orden que se describen mediante polinomios de *Zernike* de hasta grado 2, y aberraciones de alto orden descritas mediante polinomios de *Zernike* de grado mayor que 2. Las aberraciones oculares presentan también variación temporal de forma que una corrección estática de las aberraciones proporcionaría imágenes de alta resolución únicamente en ciertos momentos.

En la actualidad, son conocidas varias técnicas para la obtención de imágenes de alta resolución de la retina de un ojo. A continuación se describen las más relevantes.

Una primera técnica es la que hace referencia a la "*Óptica Adaptativa*" *[R. K. Tyson, Principles of Adaptive Optics (Academic, San Diego, Calif., 1991)]*. Esta técnica puramente óptica consiste en usar ciertos dispositivos ópticos, tales como espejos deformables o moduladores espaciales de luz, que permiten introducir de forma controlada diferencias de camino óptico entre las distintas partes del frente de ondas con aberraciones, con el fin de conseguir a su salida un frente de ondas sin aberraciones. El camino óptico que hay que corregir se determina mediante el empleo de un sensor de frente de onda que permite medir la aberración para la posterior corrección de la misma mediante un dispositivo óptico determinado. Esta técnica se ha usado tanto en astronomía como para la obtención de imágenes de la retina y se ha incorporado tanto a retinógrafos como a oftalmoscopios confocales, y tomógrafos de coherencia óptica, entre otros sistemas oftálmicos. A pesar que ésta es una técnica exitosa para obtener imágenes de alta resolución de la retina de un ojo, presenta como principal inconveniente el hecho que se trata de una técnica costosa y de complejidad técnica elevada.

Una segunda técnica empleada en la obtención de imágenes de alta resolución de la retina es la técnica de "*Deconvolución Ciega*" (en inglés, *Blind Deconvolution*) *[V. Nourrit et al., "Blind deconvolution for high-resolution confocal scanning laser ophthalmoscopy" J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 7 (2005), p. 585]*. Esta técnica puramente computacional parte de considerar que la imagen registrada es el resultado de la convolución de la respuesta de

impulso del sistema con la imagen geométrica del objeto proporcionada por el sistema óptico empleado. Mediante algoritmos iterativos, genéticos o híbridos, esta técnica consigue encontrar la forma de la respuesta de impulso del sistema y obtener así una imagen sin degradación. Como es una técnica puramente computacional, es muy sensible a la relación señal/ruido de la imagen así como a las hipótesis sobre la formación de la imagen y los algoritmos de búsqueda de la imagen sin degradar implementados. El principal inconveniente de esta técnica se basa en el hecho que requiere de un algoritmo iterativo para corregir las imágenes, lo que supone una inversión en tiempo importante.

Existe también una tercera técnica conocida como "*Deconvolución tras corrección parcial y medida de frente de onda*" *[J. Arines, "Partially compensated deconvolution from wavefront sensing images of the eye fundus", Optics Communications, Volume 284, Issue 6, p. 1548-1552]*. Esta técnica es una técnica híbrida, ya que tiene una parte óptica en la que con la intervención de una lámina de fase personalizada se corrigen las aberraciones estáticas del ojo del sujeto y mediante un sensor de frente de onda se mide la aberración dinámica residual. Esta información se usa para computar la respuesta de impulso del sistema en el instante en el que se adquiere la imagen retiniana que mediante procesos de deconvolución permite obtener una imagen de retina sin degradar. En este caso, esta técnica se encuentra entre las técnicas anteriormente descritas en términos de complejidad y de coste de materiales requeridos para su ejecución.

Además, las dos últimas técnicas descritas "*Deconvolución Ciega*" y "*Deconvolución tras corrección parcial y medida de frente de onda*" (obviamente dos técnicas basadas en deconvolución) presentan también el inconveniente que se ven fuertemente afectadas por el ruido en las imágenes obtenidas de la retina de un ojo.

Otra técnica híbrida, que aún no ha sido probada para la obtención de imágenes de alta resolución de la retina de un sujeto es la "*Codificación del Frente de Onda*" (en inglés, *Wavefront Coding*) *[E. R. Dowski and W. T. Cathey, "Extended depth of field through Wavefront Coding," Appl. Opt. 34, 1859-1866 (1995)]*. Esta técnica se basa en modificar el frente de onda de tal forma que la función de transferencia óptica del sistema es sensiblemente más invariante a cambios en la forma del frente aberrado que sin su uso. Esta invariancia se manifiesta de manera que la imagen del objeto observado depende poco de las aberraciones presentes en el sistema y por tanto la misma respuesta de impulso del sistema permite restaurar degradaciones ocasionadas por frentes de onda muy distintos. Los sistemas de "*Codificación del Frente de Onda*" involucran: un sistema óptico, un elemento codificador de fase, un sistema de registro de la imagen, y un decodificador que se encarga de restaurar la imagen degradada.

En la patente estadounidense US7260251, con título "*Systems and methods for minimizing aberrating effects in imaging systems*", se describe un sistema que explota la técnica de "*Codificación del Frente de Onda*" para reducir el efecto de las aberraciones introducidas por un medio intermedio. Esta referencia presenta las siguientes limitaciones:

- la invención propuesta se limita a tratar aberraciones relacionadas con el enfoque introducidas por el medio intermedio;

- la función de transferencia óptica del sistema formador de imagen es sustancialmente invariante a aberraciones relacionadas con desenfoque;

- las aberraciones que consideran son: desenfoque, aberración esférica, astigmatismo, curvatura de campo, aberración cromática, desenfoque por desplazamiento entre elementos debidos a cambios de temperatura y presión, trifolio y coma;

- el decodificador debe ser variante con el desplazamiento para poder tratar con aberraciones que incluyan coma;
- el decodificador debe poder cambiar con el tiempo siempre que las aberraciones dependan del tiempo;
- emplea un sistema de óptica adaptativa para reducir las distorsiones ópticas. Esta invención no está pensada para ser usada con aberraciones de alto orden diferentes a las presentadas, o sea, coma y trifolio.

En el documento de patente estadounidense US7583442, con título "*Extended depth of field optical systems*", se presenta un sistema óptico con una profundidad de foco aumentada que usa para ello el concepto de "*Codificación del Frente de Onda*". Básicamente, el documento describe un sistema y método para obtener un sistema óptico casi invariante a errores de desenfoque, el cual es caracterizado mediante una función de ambigüedad y una función de respuesta de impulso. Esta patente se centra únicamente en aberraciones del tipo de desenfoque.

La patente estadounidense US7025454, con título "*Extended depth of field optics for human vision*", presenta una invención que propone el uso de una lente de contacto o intraocular que codifica el frente con el fin de extender la profundidad de campo del ojo humano, considerando que la decodificación de la imagen la realiza el cerebro. Esta invención está limitada por considerar que la propuesta sirve para extender el rango de enfoque en personas con un rango de acomodación reducido.

Finalmente, en el documento *[E. R. Dowski and G. E. Johnson, "Wavefront coding: a modern method of achieving high-performance and/or low-cost imaging systems," Proc. SPIE 3779, 137-145 (1999)]* se presenta el concepto de "*Codificación del Frente de Onda*" para extender la profundidad de foco de sistemas formadores de imagen. Básicamente, el documento pone como ejemplo un sistema de identificación de iris y otro de huella digital en los que el iris y el dedo están fuera del plano de enfoque y gracias a que el sistema usa la técnica de "*Codificación del Frente de Onda*" pueden obtener imágenes suficientemente buenas como para identificar a la persona.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

Por lo tanto, existe la necesidad de nuevos procedimientos, productos de programa informático y sistemas para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo, que solucionen al menos alguno de los problemas antes mencionados. Es un objetivo de la presente invención satisfacer dicha necesidad.

Este objetivo se consigue proporcionando un sistema para obtener al menos una imagen, por ejemplo de alta resolución, de la retina de un ojo, que comprende:

- un sub-sistema adaptado para reducir la magnitud del astigmatismo presente en al menos un haz de luz proveniente de la retina del ojo;
- un sub-sistema adaptado para codificar el haz de luz proveniente de la retina del ojo;
- un sub-sistema adaptado para convertir el haz de luz codificado en una imagen codificada;
- un sub-sistema adaptado para decodificar la imagen codificada de la retina del ojo.

De este modo, con la provisión del sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo se consigue reducir la magnitud de las aberraciones presentes en el haz de luz proveniente del ojo y así utilizar un mismo sub-sistema de codificación y un mismo sub-sistema de decodificación para una gran variedad de haces de luz, con un gran rango de variación en cuanto a la magnitud de las aberraciones de astigmatismo. Así, se consigue una respuesta del sistema sustancialmente invariante a las aberraciones presentes en el haz de luz.

Sin la presencia del sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo, el sub-sistema de codificación debería introducir una codificación en el haz de luz proveniente del ojo que dependiera de la magnitud del mismo. Esta estrategia forzaría a medir o determinar teórica o numéricamente el sub-sistema de decodificación para cada una de las posibles codificaciones que se introdujeran en el haz de luz, y a almacenar todos los posibles sub-sistemas de decodificación para escoger en cada caso el correspondiente a la codificación empleada en un determinado momento.

El sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo (que puede ser de naturaleza óptica) presente en el haz de luz proveniente del ojo puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o una combinación de ellos):

- al menos una lente esferotórica;
- al menos una lente esferocilíndrica;
- al menos un espejo tórico;
- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un espejo deformable;
- al menos un modulador espacial de luz.

El sub-sistema de codificación del haz de luz (que puede ser también de naturaleza óptica) tiene como objetivo modificar la fase del haz de luz para que la función óptica de transferencia resultante de la combinación del sistema de la invención y las aberraciones presentes en el haz de luz sea sustancialmente invariante a estas aberraciones, o a las presentes en el propio sistema. Más concretamente, este sub-sistema es el responsable de la codificación de la imagen capturada de la retina a través de la codificación del haz de luz, durante cuya codificación la imagen es emborronada (a través del haz de luz) de forma tal que este emborronamiento es sustancialmente invariante a las aberraciones presentes en el haz de luz proveniente de la retina del ojo. Este sub-sistema de codificación del haz de luz puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o unas combinación de ellos):

- al menos un espejo deformable;
- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un elemento dispersor;
- al menos una máscara de transmitancia variable;
- al menos un sub-sistema de codificación de frente de onda (*wavefront coding*).

Por otro lado, el sub-sistema de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada, puede ser cualquier sistema de captación de radiación que proporcione imágenes retinianas. Así, por ejemplo, este sub-sistema puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o una combinación de ellos):

- al menos una cámara con objetivo;
- al menos un oftalmoscopio;
- al menos un retinógrafo;
- al menos una cámara *Scheimpflug*;
- al menos un sistema de tomografía de coherencia óptica;
- al menos un sistema de microscopía confocal;
- al menos un sistema de imagen polarimétrica;
- al menos un sistema de angiografía;
- al menos un sistema de retinografía monocromática;
- al menos un biomicroscopio;
- al menos una lámpara de hendidura.

Por otro lado, el sub-sistema de decodificación de la imagen codificada puede comprender al menos un filtro de restauración, tal como un filtro de Wiener, y tiene como objetivo deshacer el emborronamiento generado por el sub-sistema de codificación del haz de luz, y las aberraciones presentes en el haz de luz. Este sub-sistema de decodificación depende en gran medida del sub-sistema de codificación y se determina mediante cálculo teórico, simulación óptica, o bien mediante la medida de respuesta de impulso del sistema. Básicamente, este sub-sistema de decodificación de la imagen codificada de la retina puede comprender un filtro de restauración, para cuya construcción se utiliza información referente al sub-sistema de codificación del haz de luz.

Según una realización de la invención, el sistema puede comprender un conjunto óptico dispuesto entre el ojo y un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de codificación del haz de luz, estando adaptado este conjunto óptico para dirigir el haz de luz proveniente de la retina del ojo hacia el sub-sistema seleccionado.

En este punto es importante señalar que la disposición del sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo y del sub-sistema de codificación del haz de luz dentro del sistema puede ser variante, es decir, tanto puede estar dispuesto el sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo como una etapa previa al sub-sistema de codificación del haz de luz, como al revés. Por lo tanto, la disposición del conjunto óptico, si es requerido, será entre el ojo y el sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo en caso que éste esté dispuesto en el sistema como una etapa previa al sub-sistema de codificación del haz de luz, o será entre el ojo y el sub-sistema de codificación del haz de luz en caso que éste esté dispuesto en el sistema como una etapa previa al sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo.

Según otra realización, el sistema puede comprender un conjunto óptico dispuesto entre dos sub-sistemas, uno de los cuales es el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el otro

es el sub-sistema de codificación del haz de luz, estando adaptado este conjunto óptico para dirigir el haz de luz desde un sub-sistema hacia el otro sub-sistema.

Tal como se ha comentado anteriormente, la disposición en el sistema de ambos sub-sistemas puede ser variante. Por esta razón, si el sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo está dispuesto como una etapa previa al sub-sistema de codificación del haz de luz, este conjunto óptico, si es requerido, tendrá como objetivo dirigir el haz de luz desde el sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo hacia el sub-sistema de codificación del haz de luz. Por el contrario, si el sub-sistema de codificación del haz de luz está dispuesto como una etapa previa al sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo, este conjunto óptico tendrá como objetivo dirigir el haz de luz desde el sub-sistema de codificación del haz de luz hacia el sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo.

De acuerdo con aún otra realización, el sistema puede comprender un conjunto óptico dispuesto entre un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de codificación del haz de luz, y el sub-sistema de conversión, estando adaptado este conjunto óptico para dirigir el haz de luz desde el sub-sistema seleccionado hacia el sub-sistema de conversión.

Nuevamente, la disposición en el sistema del sub-sistema de reducción del astigmatismo y del sub-sistema de codificación del haz de luz marcará la disposición de este conjunto óptico, si es que es requerido. Así, si el sub-sistema de reducción del astigmatismo está dispuesto como una etapa previa al sub-sistema de codificación del haz de luz, este conjunto óptico podrá estar dispuesto entre el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de conversión. Por el contrario, si el sub-sistema de codificación del haz de luz está dispuesto como una etapa previa al sub-sistema de reducción del astigmatismo, este conjunto óptico podrá estar dispuesto entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de conversión.

Por otro lado, la invención puede comprender un sub-sistema (por ejemplo, de naturaleza óptica) adaptado para reducir las aberraciones de desenfoque presentes en el haz de luz proveniente de la retina del ojo, cuyo sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o una combinación de ellos):

- al menos una lente esférica;
- al menos un espejo esférico;
- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un sistema de Badal;
- al menos un espejo deformable;
- al menos una lente sintonizable;
- al menos un modulador espacial de luz;
- al menos una lente móvil.

La combinación del sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo y del sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque es adecuada para reducir aún más

la magnitud de la aberración presente en el haz de luz y así poder utilizar un mismo sub-sistema de codificación del haz de luz y un mismo sub-sistema de decodificación de la imagen codificada, para una gran variedad de haces de luz con un gran rango de variación en cuanto a la magnitud de las aberraciones de astigmatismo y desenfoque. Sin la presencia de estos dos sub-sistemas, el sub-sistema de codificación del haz de luz debería introducir una codificación en el haz incidente que dependiera de la magnitud del mismo. Esta estrategia forzaría a medir o a determinar teórica o numéricamente el sub-sistema de decodificación de la imagen codificada para cada una de las posibles codificaciones que se vayan a introducir en el haz de luz, y a almacenar todos los posibles sub-sistemas de decodificación para escoger en cada caso el correspondiente a la codificación empleada en un determinado momento.

Así, el haz de luz incidente en el sistema, es decir el proveniente de la retina del ojo, es parcialmente corregido en sus términos de astigmatismo y desenfoque mediante el sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque respectivamente, y codificado mediante el sub-sistema de codificación del haz de luz, para conseguir una respuesta del sistema de acuerdo con la invención sustancialmente invariante a las aberraciones presentes en el haz de luz. Este haz de luz es recogido mediante el sub-sistema de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada. La imagen codificada proporciona por este sub-sistema es posteriormente decodificada por el sub-sistema de decodificación.

Por lo tanto, se consigue que el sub-sistema de decodificación, una vez caracterizado, sea independiente de las aberraciones presentes en el haz de luz proveniente de la retina y de las configuraciones del sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo y del sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque.

De acuerdo con una realización de la invención, el sistema puede comprender un conjunto óptico dispuesto entre el ojo y un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo, el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque, estando adaptado este conjunto óptico para dirigir el haz de luz proveniente de la retina de ojo hacia el sub-sistema seleccionado.

La disposición de estos tres sub-sistemas (el sub-sistema de reducción del astigmatismo, el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque) dentro del sistema también puede ser variante, tal como sucedía con la combinación de únicamente dos sub-sistemas (el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de codificación del haz de luz). Así, de acuerdo con el orden en el que estén dispuestos estos sub-sistemas dentro del sistema, este conjunto óptico, si es requerido, podría estar dispuesto entre:

- el ojo y el sub-sistema de reducción del astigmatismo;
- el ojo y el sub-sistema de codificación del haz de luz;
- el ojo y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque.

Por otro lado, el sistema puede comprender también al menos un conjunto óptico dispuesto entre dos sub-sistemas seleccionados de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo, el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque, estando adaptado este conjunto óptico para dirigir el haz de luz desde un sub-sistema hacia el otro sub-sistema.

De este modo, y nuevamente dependiendo de la disposición de los sub-sistemas dentro del sistema, pueden darse multitud de combinaciones con este conjunto óptico. Así, por

ejemplo, si el primer sub-sistema dispuesto dentro del sistema es el sub-sistema de reducción del astigmatismo, el conjunto óptico, si es requerido, podría estar dispuesto entre:

- el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de codificación del haz de luz; o
- el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque.

En el primero de los casos planteados también podría disponerse otro conjunto óptico (que puede tener una configuración diferente al conjunto óptico) entre el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque, mientras que en el segundo de los casos planteados, podría disponerse este otro conjunto óptico entre el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque y el sub-sistema de codificación del haz de luz.

En caso que el primer sub-sistema dispuesto dentro del sistema sea el sub-sistema de codificación del haz de luz, el conjunto óptico, si es requerido, podría estar dispuesto entre:

- el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción del astigmatismo; o
- el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque.

En el primero de los casos planteados también podría disponerse otro conjunto óptico (que puede tener una configuración diferente al conjunto óptico) entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque, mientras que en el segundo de los casos planteados, podría disponerse este otro conjunto óptico entre el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque y el sub-sistema de reducción del astigmatismo.

Finalmente, si el primer sub-sistema dispuesto dentro del sistema es el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque, el conjunto óptico, si es requerido, podría estar dispuesto entre:

- el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque y el sub-sistema de codificación del haz de luz; o
- el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque y el sub-sistema de reducción del astigmatismo.

En el primero de los casos planteados también podría disponerse otro conjunto óptico (que puede tener una configuración diferente al conjunto óptico) entre el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción del astigmatismo, mientras que en el segundo de los casos planteados, podría disponerse este otro conjunto óptico entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de codificación del haz de luz.

Además, el sistema puede comprender un conjunto óptico dispuesto entre un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo, el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque, y el sub-sistema de conversión, estando adaptado este conjunto óptico para dirigir el haz de luz desde el sub-sistema seleccionado hacia el sub-sistema de conversión.

Nuevamente, dependiendo de la disposición de cada uno de los tres sub-sistemas dentro del sistema (es decir, dependiendo del sub-sistema que esté dispuesto como última etapa dentro del sistema general), podría disponerse el conjunto óptico, si es requerido, entre:

- el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de conversión;
- el sub-sistema de codificación del haz de luz y el sub-sistema de conversión;
- el sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque y el sub-sistema de conversión.

El sistema de acuerdo con la invención puede comprender además un sub-sistema adaptado para iluminar la retina del ojo, siendo generado el haz de luz proveniente de la retina del ojo como respuesta a la acción de este sub-sistema de iluminación. El sub-sistema de iluminación puede comprender un sistema generador de un haz de luz o un sistema generador de fluorescencia. En ambos casos, el resultado final es la generación de un haz de luz procedente de la retina del ojo, que lo atraviesa, lo cual provoca que la imagen de la retina sea degradada por diferentes aberraciones presentes en el ojo, cuyas aberraciones pueden ser dinámicas y/o estáticas de bajo y/o alto orden.

De acuerdo con un segundo aspecto, la invención proporciona un procedimiento para obtener al menos una imagen, por ejemplo de alta resolución, de la retina de un ojo, que comprende:

- reducir la magnitud del astigmatismo presente en al menos un haz de luz proveniente de la retina del ojo;
- codificar el haz de luz proveniente de la retina del ojo;
- convertir el haz de luz codificado en una imagen codificada;
- decodificar la imagen codificada de la retina del ojo.

Además, el procedimiento puede comprender reducir las aberraciones de desenfoque presentes en el haz de luz proveniente de la retina del ojo.

De este modo, el procedimiento para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo puede comprender recoger la luz procedente del ojo y aplicarle una corrección de astigmatismo y desenfoque para eliminar o reducir significativamente estas aberraciones producidas por el ojo; codificar el haz de luz resultante para obtener una imagen invariante a aberraciones; capturar la radiación resultante para convertirla en una imagen codificada; y decodificar la imagen codificada para obtener una imagen de la retina del ojo, sin aberraciones. Todo ello da como resultado la posibilidad de obtener imágenes de alta resolución de la retina de un ojo para distintos sujetos con errores refractivos muy dispares.

De acuerdo con una realización, el procedimiento puede comprender también iluminar la retina del ojo, siendo generado el haz de luz proveniente de la retina del ojo como respuesta a esta acción.

De acuerdo con otro aspecto, la invención proporciona un producto de programa informático que comprende instrucciones de programa para provocar que un sistema de computación realice el procedimiento para obtener al menos una imagen (por ejemplo, en alta resolución) de la retina de un ojo, según se ha descrito anteriormente.

Dicho programa informático puede estar almacenado en unos medios de almacenamiento físico, tales como unos medios de grabación, una memoria de ordenador, o una memoria de solo lectura, o puede ser portado por una onda portadora, tal como eléctrica u óptica.

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "comprende" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención. Los ejemplos y dibujos se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Los signos numéricos relativos a los dibujos y colocados entre paréntesis en una reivindicación, son solamente para intentar aumentar la comprensión de la reivindicación, y no deben ser interpretados como limitantes del alcance de la protección de la reivindicación. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas.

Otros objetos, ventajas y características de realizaciones de la invención se pondrán de manifiesto para el experto en la materia a partir de la descripción, o se pueden aprender con la práctica de la invención.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

A continuación se describirán realizaciones particulares de la presente invención a título de ejemplo no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

La Figura 1 muestra un diagrama de bloques de una posible realización de un sistema para obtener imágenes de la retina de un ojo, de acuerdo con la invención;

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático de una posible realización del sub-sistema de reducción del astigmatismo que puede estar comprendido en el sistema de la Figura 1;

La Figura 3 muestra un interferograma de la fase generada por una realización del sub-sistema de codificación del haz de luz proveniente de la retina de un ojo, pudiendo estar comprendido este sub-sistema en el sistema de la Figura 1;

La Figura 4 muestra un diagrama esquemático de una posible realización del sub-sistema de reducción de las aberraciones de desenfoque presentes en el haz de luz, pudiendo estar comprendido este sub-sistema en el sistema mostrado en la Figura 1;

La Figura 5 muestra un diagrama esquemático de una posible realización de un sistema de acuerdo con la invención, en el que el sub-sistema de conversión es un retinógrafo;

La Figura 6 muestra un diagrama esquemático de una posible realización de un sistema para obtener imágenes de la retina de un ojo, de acuerdo con la invención;

La Figura 7 muestra una serie de imágenes de la respuesta de impulso del sistema cuando se disponen en su entrada diferentes ojos con diferentes errores refractivos (aberraciones);

La Figura 8 muestra diferentes imágenes que representan la variación temporal de la respuesta de impulso de un ojo con aberraciones, las correspondientes imágenes de la retina del ojo degradadas por las aberraciones del ojo, y las correspondientes imágenes proporcionadas por una posible realización del sistema de acuerdo con la invención;

La Figura 9 muestra diferentes imágenes que representan la respuesta de impulso de diferentes aberraciones oculares, la imagen degradada por las aberraciones, y la imagen proporcionada por una posible realización del sistema de acuerdo con la invención, para tres aberraciones oculares distintas.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE REALIZACIONES PARTICULARES

A continuación se realizará la descripción de una posible realización preferida de la invención, en la que, tal como puede verse en la Figura 1, el sistema 100 para obtener imágenes en alta resolución de la retina de un ojo 101 de, por ejemplo, un sujeto puede comprender un primer conjunto óptico 103 que tiene como objetivo capturar al menos un haz de luz H que emana del ojo 101, siendo este haz de luz H el resultado de iluminar el ojo mediante un sub-sistema 102 de iluminación. La iluminación del ojo puede conseguirse, por ejemplo, por fluorescencia o a partir de la generación de un haz de luz dirigido hacia la retina del ojo. El haz de luz H que proviene de la retina del ojo (y a partir del cual se obtendrá su imagen) presenta una degradación de la imagen de la retina debida a aberraciones presentes en el ojo, generándose esta degradación cuando el haz de luz H atraviesa el ojo. Estas aberraciones del ojo pueden ser estáticas y/o dinámicas, de bajo y/o de alto orden, y deben ser corregidas.

El sistema 100 puede comprender además, como primera herramienta para reducir la degradación de la imagen de la retina descrita, un sub-sistema 104 (que puede ser de naturaleza óptica) adaptado para reducir la magnitud del astigmatismo presente en el haz de luz H proveniente de la retina y que se genera en el haz de luz H al atravesar el ojo 101. Este haz de luz H llega a este sub-sistema por la acción del primer conjunto óptico 103, que dirige el haz de luz que captura proveniente de la retina del ojo hacia el sub-sistema de reducción de la magnitud del astigmatismo. Más concretamente, en la presente realización, el conjunto óptico 103 conjuga el plano de la pupila del ojo 101 con un plano en el que se sitúa el sub-sistema 104 de reducción de la magnitud del astigmatismo presente en el frente de ondas. En este punto es importante destacar que la modificación de la fase en el plano de la pupila conlleva la codificación de la imagen de la retina.

Además, el sistema 100 puede comprender también un segundo conjunto óptico 105 adaptado para dirigir el haz de luz proveniente del sub-sistema 104 de reducción del astigmatismo, hacia un sub-sistema 106 de codificación del haz de luz, el cual también puede ser de naturaleza óptica. En este caso, este segundo conjunto óptico 105 conjuga el plano de la imagen de la pupila del ojo 101 con el plano donde se encuentra el sub-sistema 106 de codificación del haz de luz, encargado de codificar el frente de onda para aumentar sensiblemente la insensibilidad de la función de transferencia óptica (OTF) frente a variaciones en el frente de onda.

Por otro lado, el sistema puede comprender también un tercer conjunto óptico 107 adaptado para dirigir el haz de luz H proveniente del sub-sistema 106 de codificación del haz de luz, hacia un sub-sistema 108 (que puede ser de naturaleza óptica) de reducción de las aberraciones de desenfoque (como segunda herramienta para reducir la degradación de la imagen de la retina debida a aberraciones presentes en el ojo, tal como se ha comentado anteriormente) presentes también en el haz de luz H al atravesar el ojo. Más concretamente este tercer conjunto óptico 107 tiene como objetivo conjugar el plano imagen de la pupila del ojo con el sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque presentes en el frente de onda.

El sistema 100 de acuerdo con la presente realización preferida puede comprender además un cuarto conjunto óptico 109 adaptado para dirigir el haz de luz H proveniente del sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque, hacia un sub-sistema 110 de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada. Más concretamente, este cuarto conjunto óptico 109 tiene como objetivo dirigir el haz de luz H con el frente de onda modificado por los sub-sistemas y conjuntos ópticos descritos anteriormente, hacia el sub-sistema 110 de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada.

Finalmente, el sistema puede comprender un sub-sistema 111 de decodificación de la imagen codificada de la retina del ojo, para decodificar computacionalmente la imagen codificada.

Por consiguiente, el sistema 100 para obtener una imagen en alta resolución de la retina de un ojo puede comprender los siguientes elementos:

- el primer conjunto óptico 103 adaptado para capturar al menos un haz de luz H que emana del ojo 101 y dirigirlo hacia el sub-sistema 104 de reducción de la magnitud de astigmatismo presente en el haz de luz H;
- el sub-sistema 104 de reducción de la magnitud de astigmatismo;
- el segundo conjunto óptico 105 adaptado para dirigir el haz de luz H proveniente del sub-sistema 104 de reducción del astigmatismo, hacia el sub-sistema 106 de codificación del haz de luz;
- el sub-sistema 106 de codificación del haz de luz;
- el tercer conjunto óptico 107 adaptado para dirigir el haz de luz proveniente del sub-sistema 106 de codificación del haz de luz H, hacia el sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque;
- el sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque;
- el cuarto conjunto óptico 109 adaptado para dirigir el haz de luz H proveniente del sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque, hacia el sub-sistema 110 de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada;
- el sub-sistema 110 de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada;
- el sub-sistema 111 de decodificación de la imagen codificada de la retina del ojo.

En este punto, es importante destacar que la presencia de los conjuntos ópticos 103, 105, 107, 109 no siempre es necesaria. Así, en una posible realización, el sistema puede no comprender ningún de los conjuntos ópticos descritos, en otra realización puede comprender al menos uno de los conjuntos ópticos descritos, mientras que en otra posible realización el sistema puede comprender la totalidad de los conjuntos ópticos descritos.

Del mismo modo, también es importante destacar que la presencia en el sistema 100 del sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque no siempre es necesaria, aunque su presencia mejora ostensiblemente el rendimiento del sistema al reducir aún más la degradación de la imagen de la retina producida por las aberraciones presentes en el ojo, e incluso en el propio sistema.

El sub-sistema 104 de reducción de la magnitud del astigmatismo puede presentar cualquier configuración adecuada para conseguir el objetivo dentro del sistema 100. Así, por ejemplo, este sub-sistema 104 puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o una combinación de ellos), los cuales se describen a modo de ejemplo no limitativo:

- al menos una lente esferotórica;
- al menos una lente esferocilíndrica;
- al menos un espejo tórico;

- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un espejo deformable;
- al menos un modulador espacial de luz.

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático de una posible realización de un sub-sistema 104 de reducción de la magnitud del astigmatismo. En esta posible realización, el sub-sistema puede comprender un par de lentes esferotóricas 200 201 montadas en dos soportes (no mostrados) que pueden rotar solidariamente y de forma individual, así como desplazarse longitudinal y transversalmente. Con la rotación de una lente respecto a la otra se generan distintas magnitudes de astigmatismo, mientras que con la rotación del conjunto se orienta el astigmatismo generado al ángulo que convenga.

El sub-sistema 106 de codificación del haz de luz H puede presentar también cualquier configuración adecuada para conseguir su objetivo dentro del sistema 100. Así, por ejemplo, este sub-sistema 106 puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o unas combinación de ellos), los cuales se describen a modo de ejemplo no limitativo:

- al menos un espejo deformable;
- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un elemento dispersor;
- al menos una máscara de transmitancia variable;
- al menos un sub-sistema de codificación de frente de onda (*wavefront coding*).

La Figura 3 muestra un ejemplo del interferograma de la fase generada por una posible realización particular del sub-sistema 106 de codificación del haz de luz. La fase generada, a modo de ejemplo, se corresponde con la expresión:

$$17 \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\left(x^3 + y^3 - 3\left(x^2 y + y^2 x\right)\right)$$

Por otro lado, el sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque puede presentar también cualquier configuración adecuada para conseguir su objetivo dentro del sistema 100. Así, por ejemplo, este sub-sistema 108 puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o unas combinación de ellos), los cuales se describen a modo de ejemplo no limitativo:

- al menos una lente esférica;
- al menos un espejo esférico;
- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un sistema de Badal;

- al menos un espejo deformable;
- al menos una lente sintonizable;
- al menos un modulador espacial de luz;
- al menos una lente móvil.

En la Figura 4 se muestra una posible realización de un sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque. La realización, a modo de ejemplo, representa un sistema Badal en el que al menos un haz de luz H se hace pasar por un espejo 400, una lente 401, una lente 404, y un juego de dos espejos 402 y 403 que se mueven solidariamente alejándose o acercándose al par de lentes 401 y 404 con el fin de modificar la vergencia del haz de luz H proveniente de la retina del ojo a la salida de la lente 404 respecto a la que presentaba a la entrada de la lente 401.

Por lo que respecta al sub-sistema 110 de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada, obviamente también puede presentar cualquier configuración adecuada para conseguir su objetivo dentro del sistema 100. Así, por ejemplo, este sub-sistema 110 puede comprender al menos uno de los siguientes elementos (o unas combinación de ellos), los cuales se describen a modo de ejemplo no limitativo:

- al menos una cámara con objetivo;
- al menos un oftalmoscopio;
- al menos un retinógrafo;
- al menos una cámara *Scheimpflug*;
- al menos un sistema de tomografía de coherencia óptica;
- al menos un sistema de microscopía confocal;
- al menos un sistema de imagen polarimétrica;
- al menos un sistema de angiografía;
- al menos un sistema de retinografía monocromática;
- al menos un biomicroscopio;
- al menos una lámpara de hendidura.

Finalmente, una posible realización del sub-sistema 111 de decodificación de la imagen codificada puede implementarse mediante un filtro de Wiener:

$$i_{dec} = FFT\left(\frac{I * H^{*}_{dec}}{\left|H_{dec}\right|^{2} + \gamma}\right) = FFT\left(\frac{(OH)H^{*}_{dec}}{\left|H_{dec}\right|^{2} + \gamma}\right)$$

donde i_{dec} es la imagen decodificada, *iFFT* es la transformada de Fourier, *I* es el espectro de la imagen codificada, H_{dec} es la transformada de Fourier del decodificador, *H* es la transformada de Fourier de la respuesta de impulso del conjunto sistema óptico-ojo, *O* es la transformada de Fourier de la imagen geométrica del objeto observado, γ es el parámetro de

regularización del filtro de Wiener. De la ecuación anterior se desprende que cuanto más semejante sea H a H_{dec} mejor será la decodificación y por tanto la imagen será de mayor resolución espacial.

La Figura 5 muestra, a modo de ejemplo, una posible realización del sistema 100 de la invención que comprende un sub-sistema 501 (que puede corresponderse con el sub-sistema 104 de la Figura 1) de reducción de la magnitud del astigmatismo, un sub-sistema 502 (que puede corresponderse con el sub-sistema 106 de la Figura 1) de codificación del haz de luz H, y un retinógrafo 500. Más concretamente, el sub-sistema 501 de reducción de la magnitud del astigmatismo y el sub-sistema 502 de codificación del haz de luz se integran en el retinógrafo 500, de manera que estos sub-sistemas 501, 502 se encargan de reducir la magnitud del astigmatismo del frente incidente (es decir, del haz de luz proveniente de la retina) en el retinógrafo y de la codificación del frente resultante para aumentar sensiblemente la insensibilidad de la función de transferencia óptica a variaciones en el frente de onda, mientras que el retinógrafo 500 (que a su vez es un sub-sistema 110 de conversión del haz de luz codificado, en una imagen codificada, es decir, se trata de un sistema de captación de radiación) comprende también un sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque. La radiación capturada por el retinógrafo 500 es, a modo de ejemplo, decodificada mediante un filtro de Wiener 503 (que se corresponde con el sub-sistema 111 de decodificación de la imagen codificada).

En la Figura 6 se muestra, a modo de ejemplo, una posible realización preferida del sistema 100 para obtener una imagen en alta resolución de la retina de un ojo, de acuerdo con la invención. En esta realización preferida, al menos un haz de luz H que emana del ojo (ya sea por fluorescencia o porque se “excita” la retina mediante al menos un haz de luz adecuado, en ambos casos por parte del sub-sistema de 102 de iluminación de la retina) se dirige hacia un espejo 601 (que puede corresponderse con el primer conjunto óptico 103 de la Figura 1), el cual redirige el haz de luz H hacia un sub-sistema 600 (que se corresponde con el sub-sistema 108 de reducción de las aberraciones de desenfoque de la Figura 1) de reducción de las aberraciones de desenfoque, que en esta realización consiste en un sistema Badal formado por los elementos 602, 603, 604, 605. El haz de luz H proveniente de este sub-sistema 600 de reducción de las aberraciones de desenfoque se propaga hasta llegar a un sub-sistema 606 de reducción de la magnitud de astigmatismo, que en esta posible realización consiste en un conjunto de lentes esferotóricas que pueden rotar independientemente para reducir la magnitud del astigmatismo del frente que incide sobre él. El haz de luz H, tras pasar por el sub-sistema 606 de reducción de la magnitud de astigmatismo llega directamente a un sub-sistema 607 de codificación del haz de luz H, que en esta realización particular y a modo de ejemplo consiste en una lámina de fase que introduce una fase cubica de 17 micrómetros pico-valle. Tras pasar por este sub-sistema 607, el haz de luz H atraviesa un diafragma 608 y un par de lentes situadas foco a foco (609 y 611) entre las que se coloca un diafragma de campo 610. El par de lentes 609, 611 conjugan el plano donde está situado el sub-sistema 607 de codificación del haz de luz con la lente focalizadora 612, que hace imagen sobre el sub-sistema 613 de captura de radiación (que puede corresponderse con el sub-sistema 110 de conversión de la Figura 1) que en esta realización particular es una cámara CCD. Posteriormente la imagen es decodificada mediante, y a modo de ejemplo, un filtro de Wiener 614 (que puede corresponderse con el sub-sistema 111 de decodificación de la imagen codificada, de la Figura 1).

La Figura 7 pretende demostrar la importancia que tiene que el sistema de acuerdo con la invención comprenda el sub-sistema de reducción de la magnitud de astigmatismo y el sub-sistema de reducción de la magnitud del desenfoque presentes en el frente de onda. En la figura 7a se muestran una serie de imágenes de la respuesta de impulso del conjunto

sistema óptico-ojo cuando a la entrada se colocan diferentes ojos con distintos errores refractivos.

Más concretamente, la Figura 7a1 esfera 0.32esf -1.40 cil; la Figura 7a2 -1.97 esf -1.40 cil; la Figura 7a3 +0.60 esf-4.42 cil; la Figura 7a4 –‘.36 esf-0.38 cil.

En la figura 7b se muestra el decodificador (que se corresponde en este caso con la respuesta de impulso del sistema cuando estos sub-sistemas no alteran el frente de ondas) que se emplea para decodificar la imagen y obtener por tanto la imagen de alta resolución. Se puede observar que la semejanza entre la respuesta de impulso del conjunto sistema óptico-ojo y el decodificador depende de la magnitud del desenfoque y astigmatismo. De esta manera, se hace necesario disponer de estos sub-sistemas con el fin de reducir esta magnitud y mantenerla dentro de unos límites en los que la respuesta de impulso y el decodificador son semejantes. Garantizar esta semejanza es importante para conseguir una buena decodificación de la imagen.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento temporal del sistema. En la fila superior se presenta la evolución temporal de la respuesta de impulso de un ojo con aberraciones. En la fila central se muestra la imagen de la retina degradada por las aberraciones. En la fila inferior se muestran las imágenes decodificadas o restauradas proporcionadas por una posible realización del sistema de acuerdo con la invención. Se puede apreciar que el sistema propuesto puede proporcionar imágenes de alta resolución en tiempo real sin necesidad de cambiar el decodificador a pesar de que cambien las aberraciones presentes en el ojo del paciente. Las imágenes de la retina presentadas subtienden un ángulo de 1.27º.

En la Figura 9 se muestra la respuesta de impulso asociada a tres aberraciones oculares distintas, las imágenes del fondo de ojo degradadas por dichas aberraciones y las imágenes que proporciona el sistema propuesto. En los tres casos se emplea el mismo decodificador. Las imágenes de fondo de ojo presentadas subtienden un ángulo de 4.75º.

A pesar de que se han descrito aquí sólo algunas realizaciones y ejemplos particulares de la invención, el experto en la materia comprenderá que son posibles otras realizaciones alternativas y/o usos de la invención, así como modificaciones obvias y elementos equivalentes. Además, la presente invención abarca todas las posibles combinaciones de las realizaciones concretas que se han descrito. Los signos numéricos relativos a los dibujos y colocados entre paréntesis en una reivindicación son solamente para intentar aumentar la comprensión de la reivindicación, y no deben ser interpretados como limitantes del alcance de la protección de la reivindicación. El alcance de la presente invención no debe limitarse a realizaciones concretas, sino que debe ser determinado únicamente por una lectura apropiada de las reivindicaciones adjuntas.

A pesar también de que las realizaciones descritas de la invención con referencia a los dibujos comprenden sistemas de computación y procesos realizados en sistemas de computación, la invención también se extiende a programas de ordenador, más particularmente a programas de ordenador en o sobre unos medios portadores, adaptados para poner la invención en práctica. El programa de ordenador puede estar en forma de código fuente, de código objeto o en un código intermedio entre código fuente y código objeto, tal como en forma parcialmente compilada, o en cualquier otra forma adecuada para usar en la implementación de los procesos de acuerdo con la invención. El medio portador puede ser cualquier entidad o dispositivo capaz de portar el programa.

Por ejemplo, el medio portador puede comprender un medio de almacenamiento, tal como una *ROM*, por ejemplo un *CD ROM* o una *ROM* semiconductora, o un medio de grabación magnético, por ejemplo un *floppy disc* o un disco duro. Además, el medio portador puede ser

un medio portador transmisible tal como una señal eléctrica u óptica que puede transmitirse vía cable eléctrico u óptico o mediante radio u otros medios.

Cuando el programa de ordenador está contenido en una señal que puede transmitirse directamente mediante un cable u otro dispositivo o medio, el medio portador puede estar constituido por dicho cable u otro dispositivo o medio.

Alternativamente, el medio portador puede ser un circuito integrado en el que está encapsulado (*embedded*) el programa de ordenador, estando adaptado dicho circuito integrado para realizar, o para usarse en la realización de, los procesos relevantes.

REIVINDICACIONES

1. Sistema (100) para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo (101), caracterizado porque comprende:

   - un sub-sistema (104; 606) de reducción de la magnitud del astigmatismo presente en al menos un haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo (101);

   - un sub-sistema (106; 607) de codificación del haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo (101);

   - un sub-sistema (110; 613) de conversión del haz de luz (H) codificado en una imagen codificada;

   - un sub-sistema (111; 614) de decodificación de la imagen codificada de la retina del ojo (101).

2. Sistema según la reivindicación 1, caracterizado porque comprende un conjunto óptico dispuesto entre el ojo (101) y un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de codificación del haz de luz, estando dispuesto este conjunto óptico para dirigir el haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo hacia el sub-sistema seleccionado.

3. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 ó 2, caracterizado porque comprende un conjunto óptico dispuesto entre dos sub-sistemas, uno de los cuales es el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el otro es el sub-sistema de codificación del haz de luz, estando dispuesto este conjunto óptico para dirigir el haz de luz (H) desde un sub-sistema hacia el otro sub-sistema.

4. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque comprende un conjunto óptico dispuesto entre un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo y el sub-sistema de codificación del haz de luz, y el sub-sistema de conversión, estando dispuesto este conjunto óptico para dirigir el haz de luz (H) desde el sub-sistema seleccionado hacia el sub-sistema de conversión.

5. Sistema según la reivindicación 1, caracterizado porque comprende un sub-sistema (108; 600) de reducción de las aberraciones de desenfoque presentes en el haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo (101).

6. Sistema según la reivindicación 5, caracterizado porque comprende un conjunto óptico (103) dispuesto entre el ojo (101) y un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema de reducción del astigmatismo (104; 606), el sub-sistema (106; 607) de codificación del haz de luz (H) y el sub-sistema (108; 600) de reducción de las aberraciones de desenfoque, estando dispuesto este conjunto óptico (103) para dirigir el haz de luz (H) proveniente de la retina de ojo (101) hacia el sub-sistema seleccionado.

7. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 5 ó 6, caracterizado porque comprende al menos un conjunto óptico (105, 107) dispuesto entre dos sub-sistemas seleccionados de entre el sub-sistema (104; 606) de reducción del astigmatismo, el sub-sistema (106; 607) de codificación del haz de luz (H) y el sub-sistema (108; 600) de reducción de las aberraciones de desenfoque, estando dispuesto este conjunto óptico (105, 107) para dirigir el haz de luz desde un sub-sistema hacia el otro sub-sistema.

8. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, caracterizado porque comprende un conjunto óptico (109) dispuesto entre un sub-sistema seleccionado de entre el sub-sistema (104; 606) de reducción del astigmatismo, el sub-sistema (106; 607) de codificación del haz de luz (H) y el sub-sistema (108; 600) de reducción de las aberraciones de desenfoque, y el sub-sistema (110; 613) de conversión, estando dispuesto este conjunto óptico (109) para dirigir el haz de luz (H) desde el sub-sistema seleccionado hacia el sub-sistema de conversión (110; 613).

9. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, caracterizado porque el sub-sistema (108; 600) de reducción de las aberraciones de desenfoque comprende al menos uno de los siguientes elementos:

   - al menos una lente esférica;

   - al menos un espejo esférico;

   - al menos una pantalla de cristal líquido;

   - al menos una lámina de fase;

- al menos un sistema de Badal;
- al menos un espejo deformable;
- al menos una lente sintonizable;
- al menos un modulador espacial de luz;
- al menos una lente móvil.

10. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado porque comprende un sub-sistema (102) de para iluminación de la retina del ojo (101), siendo generado el haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo (101) como respuesta a la acción del sub-sistema (102) de iluminación.

11. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado porque el sub-sistema (104; 606) de reducción del astigmatismo comprende al menos uno de los siguientes elementos:

- al menos una lente esferotórica;
- al menos una lente esferocilíndrica;
- al menos un espejo tórico;
- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un espejo deformable;
- al menos un modulador espacial de luz.

12. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado porque el sub-sistema (106; 607) de codificación del haz de luz (H) comprende al menos uno de los siguientes elementos:

- al menos un espejo deformable;
- al menos una pantalla de cristal líquido;
- al menos una lámina de fase;
- al menos un elemento dispersor;
- al menos una máscara de transmitancia variable;
- al menos un sub-sistema de codificación de frente de onda (*wavefront coding*).

13. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado porque el sub-sistema (110; 613) de conversión comprende al menos uno de los siguientes elementos:

- al menos una cámara con objetivo;
- al menos un oftalmoscopio;
- al menos un retinógrafo;
- al menos una cámara *Scheimpflug*;
- al menos un sistema de tomografía de coherencia óptica;
- al menos un sistema de microscopía confocal;
- al menos un sistema de imagen polarimétrica;
- al menos un sistema de angiografía;

- al menos un sistema de retinografía monocromática;
- al menos un biomicroscopio;
- al menos una lámpara de hendidura.

14. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, caracterizado porque el sub-sistema (111; 614) de decodificación de la imagen codificada comprende al menos un filtro de restauración.

15. Procedimiento para obtener al menos una imagen de la retina de un ojo (101), caracterizado porque comprende:

- reducir la magnitud del astigmatismo presente en al menos un haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo (101);
- codificar el haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo (101);
- convertir el haz de luz (H) codificado en una imagen codificada;
- decodificar la imagen codificada de la retina del ojo (101).

16. Procedimiento según la reivindicación 15, caracterizado porque comprende:

- reducir las aberraciones de desenfoque presentes en el haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo (101).

17. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 15 ó 16, caracterizado porque comprende:

- iluminar la retina del ojo (101), siendo generado el haz de luz (H) proveniente de la retina del ojo como respuesta a esta acción.

18. Producto de programa informático caracterizado porque comprende instrucciones de programa para provocar que un sistema de computación realice el procedimiento para obtener al menos una imagen en alta resolución de la retina de un ojo (101), según una cualquiera de las reivindicaciones 15 a 17.

19. Producto de programa informático según la reivindicación 18, caracterizado porque está almacenado en unos medios de almacenamiento.

20. Producto de programa informático según la reivindicación 18, caracterizado porque es portado por una onda portadora.

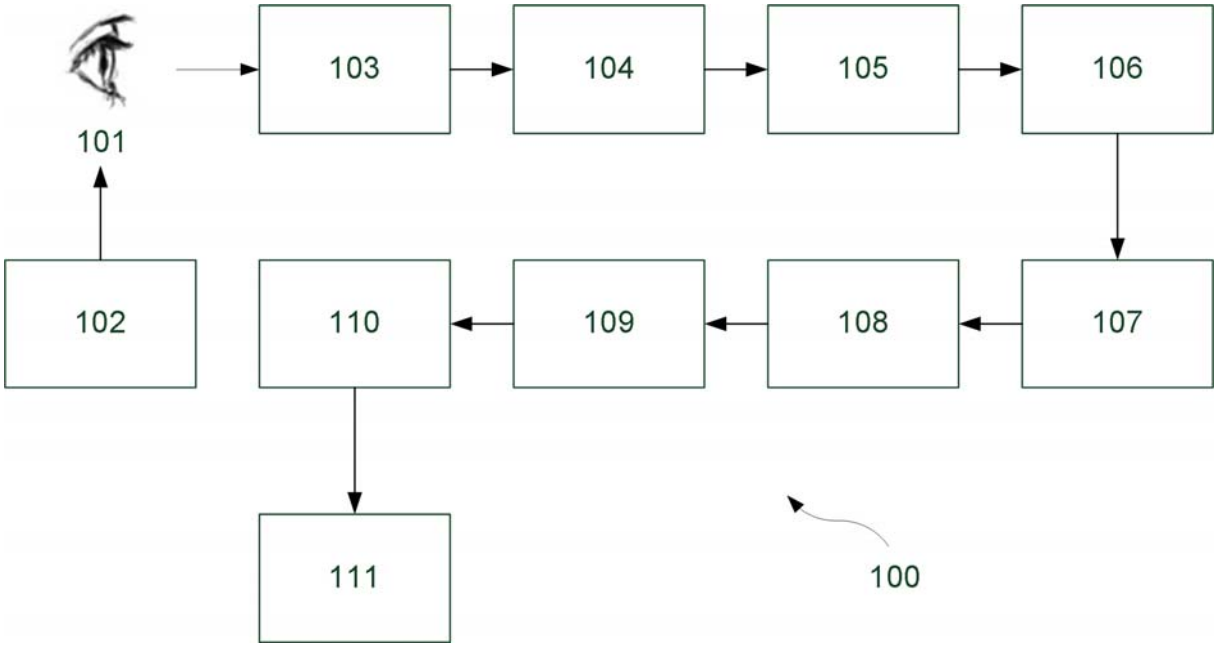

Figura 1

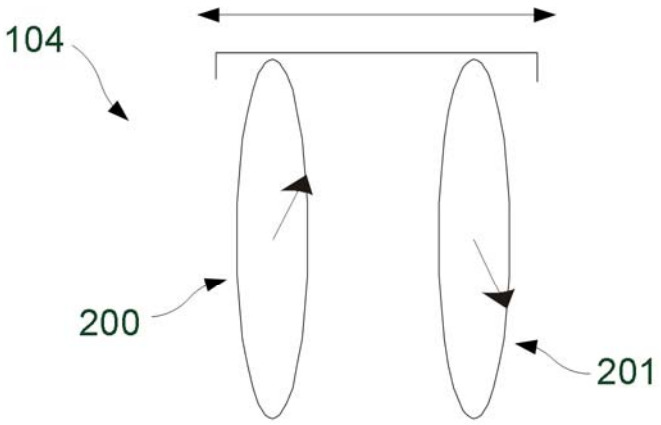

Figura 2

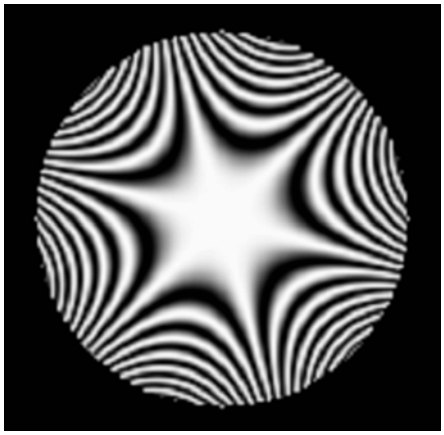

Figura 3

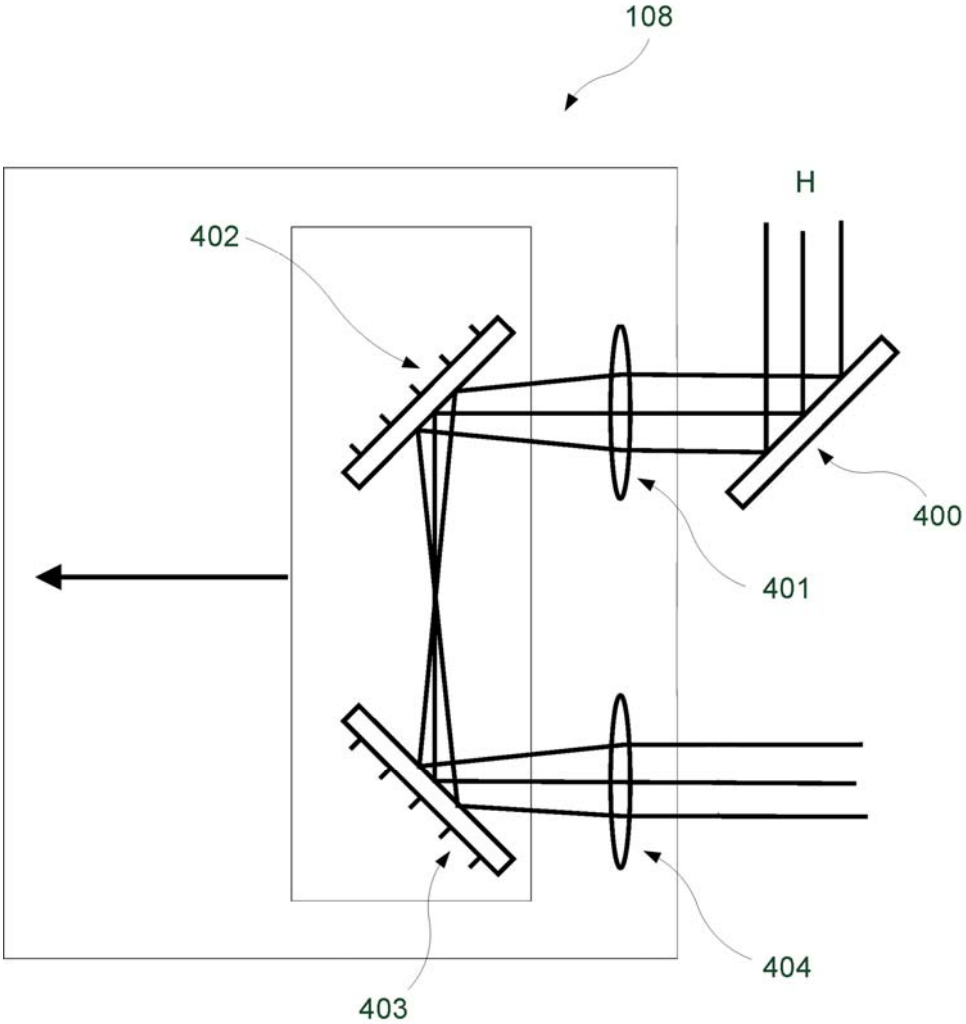

Figura 4

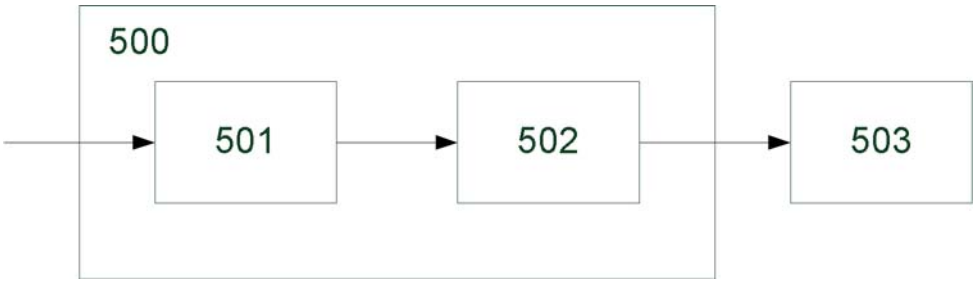

Figura 5

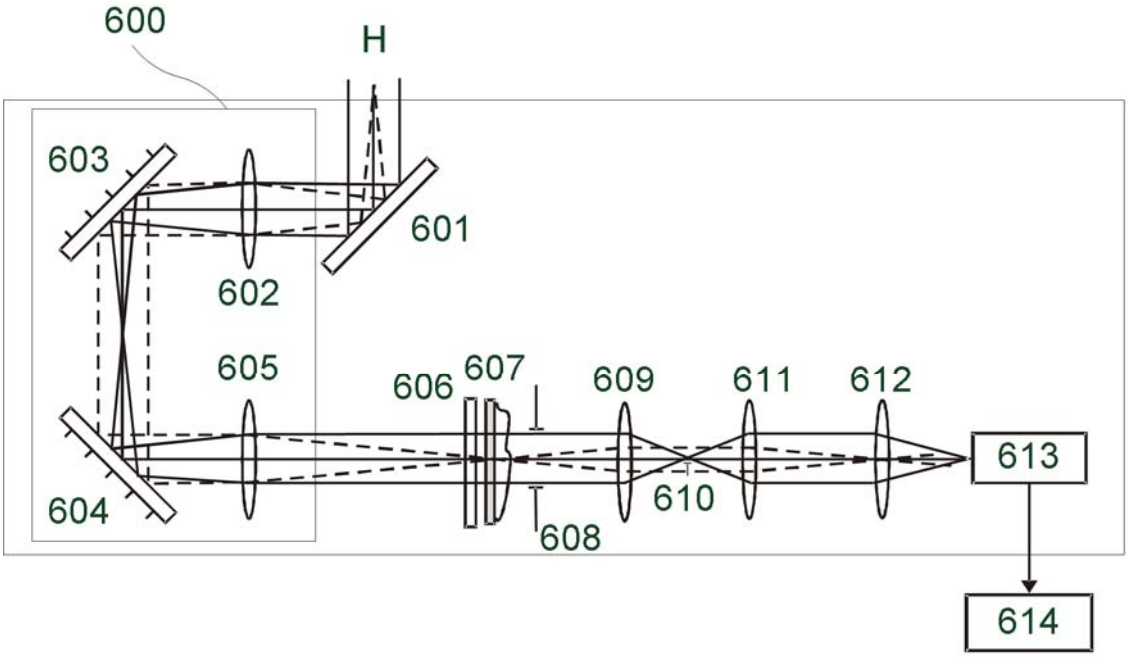

Figura 6

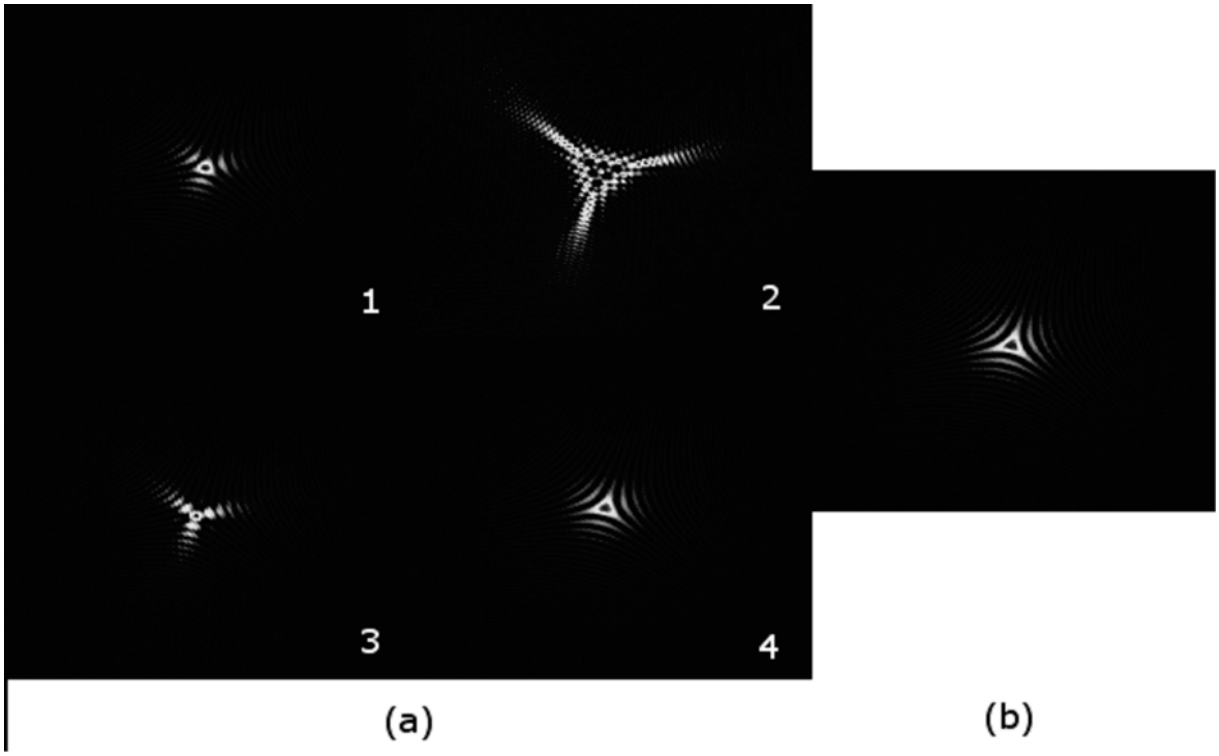

Figura 7

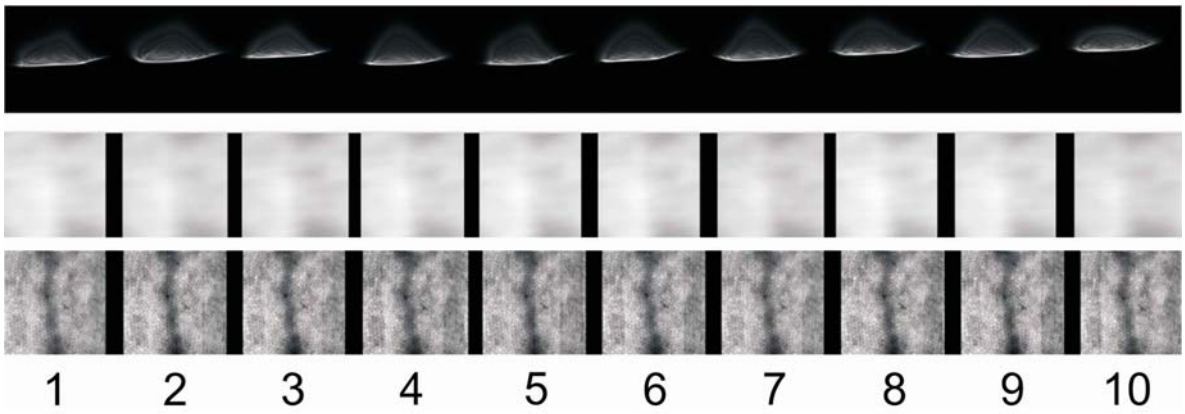

Figura 8

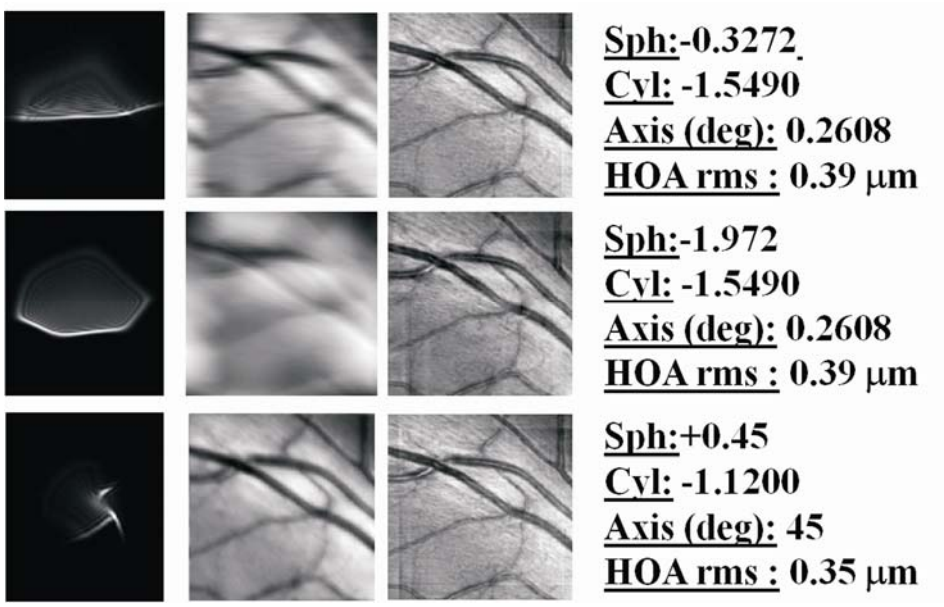
Sph:-0.3272
Cyl: -1.5490
Axis (deg): 0.2608
HOA rms : 0.39 μm
Sph:-1.972
Cyl: -1.5490
Axis (deg): 0.2608
HOA rms : 0.39 μm
Sph:+0.45
Cyl: -1.1200
Axis (deg): 45
HOA rms : 0.35 μm

Figura 9